

# APPARATUS AND PROCESS FOR THE NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT OF THE OHMIC RESISTANCE OF A THIN LAYER USING EDDY CURRENTS

**Patent number:** DE3815009  
**Publication date:** 1989-11-09  
**Inventor:** THORN GERNOT DIPL ING (DE)  
**Applicant:** LEYBOLD AG (DE)  
**Classification:**  
 - international: G01B7/02; G01N27/90; G01R27/02  
 - european: G01D5/16; G01R27/02  
**Application number:** DE19883815009 19880430  
**Priority number(s):** DE19883815009 19880430

Also published as:

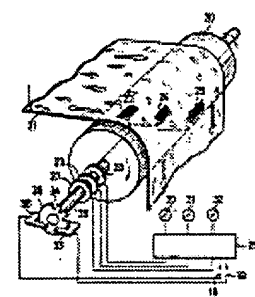
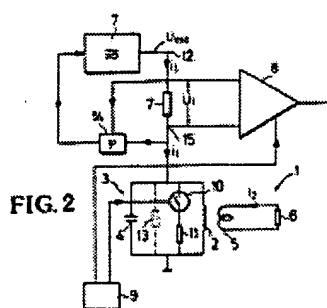
US5206588 (A)  
 JP1318976 (A)  
 GB2217859 (A)  
 IT1229313 (B)

*also included*

Report a data error here

Abstract not available for DE3815009  
 Abstract of corresponding document: **US5206588**

The invention concerns apparatus and a process for the non-destructive measurement of the ohmic resistance of thin layers according to the eddy-current principle. Here an inductor (2) is fed with a high frequency voltage ( $U_{osz}$ ) and the magnetic field of this inductor (2) is directed at the thin layer to be measured, whereby an eddy current flows in this layer the magnetic field of which weakens the magnetic field of the inductor (2). The inductor (2) is here part of an oscillating circuit (3) which is held always at resonance by means of a phase-correcting arrangement (14). Under these resonance conditions the reactive values of the oscillating circuit (3) may be neglected so that the current flowing into the oscillating circuit (3) depends solely on the ohmic resistance of this oscillating circuit (3), which in turn is determined by the ohmic resistance of the layer to be measured.



BEST AVAILABLE COPY

Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑳ Aktenzeichen: P 38 15 009.3  
㉑ Anmeldetag: 30. 4. 88  
㉒ Offenlegungstag: 9. 11. 89

⑤1 Int. Cl. 4:  
G 01 R 27/02  
G 01 N 27/90  
G 01 B 7/02  
// G 01 B 7/10

DE 38 15 009 A 1

- ⑦1 Anmelder:  
Leybold AG, 6450 Hanau, DE
- ⑦4 Vertreter:  
Schickedanz, W., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 6050  
Offenbach
- ⑦2 Erfinder:  
Thorn, Gernot, Dipl.-Ing., 6450 Hanau, DE
- ⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht zu ziehende Druckschriften:
- |       |              |
|-------|--------------|
| DE    | 26 36 999 C3 |
| DE    | 24 10 087 C2 |
| DE-PS | 13 01 858    |
| DE-PS | 8 42 676     |
| DE-AS | 17 73 857    |

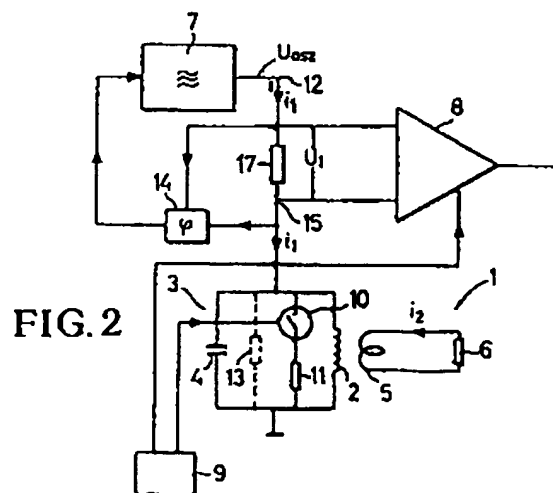
DE-AS	12 95 075
DE-AS	10 82 671
DE	37 20 180 A1
DE	34 23 977 A1
DE	34 01 466 A1
DE	33 42 417 A1
DE	33 13 820 A1
DE	32 21 379 A1
DE	30 22 078 A1
DE-OS	22 61 498
DE-GM	66 03 333
DD	2 56 996 A3
DD	2 33 197 A1
DD	2 24 946 A1
EP	00 14 729 B1

JP 81 219857 A. In: Patents Abstracts of Japan, P-548,  
Februar 18 1987, Vol.11, No.52;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

- ⑤4 Einrichtung und Verfahren zum zerstörungsfreien Messen des ohmschen Widerstands dünner Schichten nach dem Wirbelstrom-Prinzip

Die Erfindung betrifft eine Einrichtung und ein Verfahren zum zerstörungsfreien Messen des ohmschen Widerstands dünner Schichten nach dem Wirbelstrom-Prinzip. Hierbei wird eine Induktivität (2) mit einer hochfrequenten Spannung ( $U_{osz}$ ) gespeist und das Magnetfeld dieser Induktivität (2) auf die zu messende dünne Schicht gerichtet, wodurch in diese Schicht ein Wirbelstrom fließt, dessen Magnetfeld das Magnetfeld der Induktivität (2) schwächt. Die Induktivität (2) ist hierbei Teil eines Schwingkreises (3), der mittels einer Phasen-Nachregelanordnung (14) stets auf Resonanz gehalten wird. Unter diesen Resonanzbedingungen können die Blindwerte des Schwingkreises (3) vernachlässigt werden, so daß der in den Schwingkreis (3) einfließende Strom nur noch von dem ohmschen Widerstand dieses Schwingkreises (3) abhängig ist, der seinerseits von dem ohmschen Widerstand der zu messenden Schicht bestimmt wird.



Die Erfindung betrifft eine Einrichtung und ein Verfahren zum zerstörungsfreien Messen des ohmschen Widerstands dünner Schichten nach dem Wirbelstrom-Prinzip.

Bei der Messung von Eigenschaften dünner Schichten besteht ein Problem darin, daß diese Schichten durch den Meßvorgang infolge Berührung oder Kontaktierung beschädigt oder zerstört werden können. Besonders unangenehm ist es, wenn bei der Messung des elektrischen Widerstands einer dünnen Schicht diese Schicht durchgedrückt, zerkratzt oder verunreinigt wird.

Um diese Nachteile zu vermeiden, wurden bereits eine Reihe von Meßverfahren entwickelt, die Sensoren aufweisen, welche berührungslos arbeiten. So ist beispielsweise eine kapazitiv arbeitende Vorrichtung zur Messung der Schichtdicke eines Metallbelags auf einer Isolierstoffbahn bekannt, welche die Leitfähigkeit dieses Belags ohne mechanische Berührung mißt (DE-GM 68 10 362). Bei dieser Vorrichtung dienen zur Führung der Isolierstoffbahn und gleichzeitigen Messung der Leitfähigkeit ihres Metallbelags drehbare Walzen, die als Kondensatorplatten für die kapazitive Ankopplung eines Widerstandsmeßgeräts wirken.

Bei einem weiteren bekannten kapazitiven Meßverfahren werden zur elektrischen Messung von Schichtdicken an laufenden Bändern in Vakuum-Beschichtungsanlagen eine Umlenkwalze und mehrere Sensoren mit örtlich begrenztem Meßbereich eingesetzt (DE-OS 33 35 766). Hierbei sind die Sensoren an der Oberfläche der Umlenkwalze verteilt angeordnet und durch eine Übertragungseinrichtung mit einer Auswerteschaltung verbunden.

Neben diesen kapazitiven Verfahren, die hauptsächlich zum Messen des Widerstands von hochohmigen Schichten geeignet sind, sind auch noch induktive Verfahren vorgeschlagen worden, die sich mehr für die Widerstandsmessung bei niederohmigen Schichten eignen. Beispielsweise ist eine Anordnung zur berührungslosen Messung der Dicke elektrisch leitfähiger Schichten bekannt, bei der eine Induktionsspule mit einem Wechselspannungsgenerator und einer Meßeinrichtung für die Erfassung des Induktivitätswertes der Induktionsspule vorgesehen sind (DE-OS 23 45 849). Hierbei ist der Induktionsspule gegenüber unter Belassung eines Luftspalts eine zweite Induktionsspule gleicher Auslegung angeordnet. Die Stromrichtungen sind in beiden Spulen gleich, und ihre Ausgangssignale werden additiv der Meßeinrichtung aufgeschaltet.

Es ist weiterhin ein Verfahren zur zerstörungsfreien Messung der Einzeldicken von Schichtsystemen nach dem Wirbelstromverfahren bekannt, bei dem Meßsonden mit einer komplexen Impedanz eingesetzt werden, deren Realteil und Imaginärteil je für sich Informationen über zwei zu messende Schichtdicken eines Schichtsystems enthalten können (A. Ott: "Zerstörungsfreie Messung der Einzeldicken von Schichtsystemen nach dem Wirbelstrom-Verfahren", Zeitschrift für Werkstofftechnik, Heft 6, 1975, Seiten 188 bis 194). Als eigentliche Meßvorrichtung dient hierbei eine Schaltungsanordnung, die einen Generator aufweist, der eine amplitudenstabile und hochfrequente Wechselspannung erzeugt, deren Frequenz in 1-3-10-Stufung geändert werden kann. Ein Spannungs-Stromwandler leitet aus der Generatorspannung einen eingepprägten Strom ab, mit dem eine Sonde gespeist wird. Ein Verstärker verstärkt

die Sondenspannung, die wegen des eingepprägten Sondenstroms der Sondenimpedanz proportional ist, und speist dann einen Differenzverstärker, der einen konstanten, reellen Spannungsanteil subtrahiert, da der Einfluß des reellen Spulenwiderstands für die weitere Signalverarbeitung ohne Interesse ist. Für diese weitere Verarbeitung sind noch ein Gleichrichter, ein Phasendiskriminator, zwei Funktionsgeneratoren und zwei Multiplikatoren erforderlich, so daß sich insgesamt eine sehr komplex aufgebaute Auswerteschaltung ergibt. Ein Nachteil dieser bekannten Meßvorrichtung besteht auch darin, daß nur relativ dicke Schichten, z. B. Aluminium von 1 µm ... 1000 µm, gemessen werden können und daß sie nicht sehr empfindlich ist.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine nach dem Wirbelstrom-Prinzip arbeitende Einrichtung zum berührungslosen Messen des elektrischen Widerstands dünner Schichten zu schaffen, die eine einfache Auswerteschaltung aufweist.

Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst.

Der mit der Erfindung erzielte Vorteil besteht insbesondere darin, daß sich bei Messungen in Vakuumanlagen, die beispielsweise acht Stunden nicht geöffnet werden, über den ganzen Zeitraum praktisch keine Ungenauigkeiten ergeben. Außerdem kann die induktiv arbeitende Einrichtung mit einer Auswerteschaltung zusammenwirken, die auch für kapazitiv arbeitende Meßeinrichtungen geeignet ist. Hierdurch ist es möglich, den elektrischen Widerstand hochohmiger und niederohmiger Schichten über kapazitive und induktive Meßeinrichtungen durch dieselbe Auswerteeinrichtung auswerten zu lassen. Der gemessene Widerstandswert bezieht sich in der Regel auf eine rechteckige oder quadratische Fläche. Unter der Voraussetzung, daß die zu messende Schicht metallisch dicht ist und die üblichen Festkörperwerte gelten, z. B. der spezifische Widerstand, kann aus dem gemessenen Flächenwiderstand stets auf die Dicke  $a$  der Schicht geschlossen werden, für die dann

$$a = K \frac{1}{R_{\text{Fläche}}}$$

gilt.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird im folgenden näher beschrieben. Es zeigt

Fig. 1 eine Prinzipdarstellung eines induktiven Sensors für die Messung eines niederohmigen Flächenwiderstands;

Fig. 2 eine Schaltungsanordnung zum Messen eines Flächenwiderstands;

Fig. 3 einen in der Schaltungsanordnung gemäß Fig. 2 enthaltenen Schwingkreis im Falle der Resonanz;

Fig. 4 eine Vorrichtung, in welcher der erfindungsgemäße Sensor zur Anwendung kommt;

Fig. 5 einen induktiven Sensor in der Vorrichtung gemäß Fig. 4 im vergrößerten Maßstab;

Fig. 6 eine detaillierte Schaltungsanordnung für die Messung eines Widerstands nach dem Wirbelstrom-Prinzip.

In der Fig. 1 ist das Prinzip der Erfassung des Widerstandswertes einer dünnen Schicht 1 dargestellt. Unter einer dünnen Schicht werden im folgenden alle Schichten verstanden, die nicht mehr aus einzelnen Inseln bestehen. Bei Metallen trifft dies bei mehr als 3 bis 5 Atomlagen zu. Der Meßbereich bei Aluminium bewegt sich

z. B. zwischen 1 nm und 1  $\mu\text{m}$ . Über der Schicht 1 befindet sich eine Spule 2, die von einem Wechselstrom  $i_1$  durchflossen wird. Aufgrund dieses Stroms  $i_1$  bildet sich ein Wechsellmagnetfeld  $\vec{H}_1$  im Innern der Spule aus, das in der dünnen Schicht 1 einen Wirbelstrom  $i_2$  verursacht, der seinerseits ein Magnetfeld  $\vec{H}_2$  erzeugt, der das Magnetfeld  $\vec{H}_1$  schwächt. Man spricht hierbei von einer Feldverdrängung (K. Küpfmüller: Einführung in die theoretische Elektrotechnik, 11. Auflage, S. 304 ff.). Der Grad der Schwächung des Magnetfelds  $\vec{H}_1$  läßt einen Rückschluß auf den Flächenwiderstand  $R_{\square}$  der Schicht 1 zu. Der funktionelle Zusammenhang zwischen Strom  $i_1$  und dem Widerstand  $R_{\square}$  der Schicht ist in erster Näherung

$$i_1 \sim \frac{1}{R_{\square}}.$$

Hierbei wird vorausgesetzt, daß es sich bei den zu messenden Schichten um Schichten mit einer sehr geringen Schichtdicke  $a$  im Vergleich zur sogenannten Eindringtiefe  $\delta$  handelt, wobei

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \kappa}}$$

( $\omega$  = Kreisfrequenz,  $\mu$  = Permeabilität,  $\kappa$  = Leitfähigkeit).

Eine Schaltungsanordnung, mit welcher auf einfache Weise der Flächenwiderstand ermittelt werden kann, ist in der Fig. 2 dargestellt.

Die als Meßsonde dienende Spule 2 ist hier ein Teil eines Parallelschwingkreises 3, in dem sich ein Kondensator 4 befindet. Die zu messende dünne Schicht 1 ist in einem Ersatzstromkreis als Spule 5 mit einer Windung dargestellt, die parallel zu einem ohmschen Widerstand 6 liegt. Der Parallelschwingkreis ist an einen Oszillator 7 angekoppelt, der beispielsweise auf einer Frequenz von 1,8 MHz schwingt und dessen Ausgangsspannung  $U_{osz}$  konstant ist. Die Ankopplung erfolgt hierbei über einen Widerstand 17, der als Fühler für den Strom  $i_1$  dient und dessen Spannungsabfall einem Vorverstärker 8 zugeführt ist. Die zwischen dem Oszillator 7 und dem Parallelschwingkreis 3 sich ergebende Phasendrift ist über eine Phasen-Nachregelanordnung 14, die auf  $\cos \varphi = 1$  entsprechend  $\varphi = 0$  regelt, auf den Oszillator 7 rückgeführt. Die Phasen-Nachregelanordnung 14 regelt also die Phasendifferenz zwischen  $U_{osz}$  und  $U_{sensor}$  auf Null, d. h. den  $\cos \varphi$  des Verbrauchers auf 1. Die Bezugsspannung, bei der  $\varphi = 0$  ist, befindet sich am Punkt 12. Ohne Nachregelung wäre am Punkt 15  $\varphi \neq 0$ . Bei einer Nachregelung können jedoch die Spule 2 und der Kondensator 4 außer Betracht bleiben. Wenn der Parallelschwingkreis 3 in Resonanz ist, sind alle Blindelemente kompensiert, und die Hochfrequenzspannung des Sensors hat die gleiche Phasenlage wie die Spannung  $U_{osz}$ . Unter dieser Voraussetzung wird der Widerstand  $R_{\square}$  der dünnen Schicht 1 rein ohmsch in den Parallelschwingkreis 3 als Widerstand 13 herübertransformiert, weil die über Luft gekoppelten Spulen 2, 5 einen Transformator bilden.

Parallel zu der Spule 2 kann über eine externe Steuereinrichtung 9 und über einen Schalter 10 ein Eichwiderstand 11 geschaltet werden. Auf einen Kalibrierbefehl hin wird der Eichwiderstand 11 zugeschaltet, der eine

Normalbelastung simuliert. Die Steuereinrichtung 9 steuert auch noch den Vorverstärker 8 an und verstellt dessen Verstärkungsgrad stufig. Zusammen mit einer in einer Auswertung befindlichen Feinverstellung wird darauf eine Anzeige auf einen Eichpunkt eingestellt. Hierdurch ist die Anordnung von der Spule 2 bis zur Anzeige am Ausgang der Auswertung geeicht, d. h. die Steilheit hat einen bestimmten Wert. Die fernbedienbare Verstellung der Verstärkung des Vorverstärkers 8 ist deshalb sehr wichtig, damit bei hohen Empfindlichkeiten ein möglichst großer Anteil der Gesamtverstärkung des Meßsystems in den nullpunkt kompensierten Vorverstärker 8 gelegt werden kann. Andernfalls würde der Nullpunktfehler entsprechend dem Meßsignal mitverstärkt. Die Nullpunkt Kompensation erfolgt im einzelnen dadurch, daß die Drift des Vorverstärkers 8 im Sensor und auch die Widerstandsdrift der Spule 2 durch Nullen und Messen beseitigt werden. Dies geschieht z. B. dadurch, daß zwei Speicher vorgesehen sind, von denen der eine Speicher ein Nullsignal und der andere Speicher ein Meßsignal speichert, wobei die Differenz der beiden Signale als Maß für den Widerstand der zu messenden dünnen Schicht 1 dient.

Die Widerstandswerte einer dünnen Schicht 1, die mit der Anordnung nach Fig. 2 gemessen werden können, liegen vorzugsweise zwischen 10 Milliohm und 1 Kiloohm.

Der Strom  $i_1$ , der bei Resonanz des Parallelschwingkreises 3 über den Widerstand 17 fließt, wird durch den ohmschen Widerstandswert bestimmt, der sich durch die Transformation des Widerstands  $R_{\square}$  (= 6) in den Parallelschwingkreis 3 ergibt, d. h. die am Eingang des Vorverstärkers 8 anstehende Spannung  $U_1$  ergibt sich zu  $R_{17} \times i_1$ , wobei

$$i_1 = \frac{U_{osz}}{R_{17} + R_{13} \parallel R_{16}}$$

gilt.

Mit  $R_{16}$  ist hierbei der Verlustwiderstand des Kreises bezeichnet, der in der nachfolgenden Fig. 3 dargestellt ist.

$R_{17}$  und  $R_{16}$  sind konstant, während  $R_{13}$  variabel ist, und zwar zwischen einem Widerstandswert Unendlich beim "Nullen" und einem Wert  $K \times R_{\square}$  beim Messen. Da  $R_{13} \gg R_{17}$  ist, liegt praktisch  $U_{osz} = \text{const.}$  am Kreis an:

$$\Delta i_1 \sim \frac{1}{\Delta R_{13}}.$$

Der Strom  $i_1$  ist somit umgekehrt proportional zu  $R_{13}$ . Indem der Vorverstärker 8 von der jeweils gemessenen Spannung  $U_1$  die bekannte Spannung  $U_1(0)$  abzieht, erhält man  $\Delta U = i_1 \times R_{13}$ . Hieraus ergibt sich  $R_{13}$  zu  $\frac{\Delta U}{i_1}$ .

In der Praxis ist bei der beschriebenen Anordnung, wie Versuche gezeigt haben,  $R_{13}$  etwa 11 000mal größer als  $R_{\square}$ . Mißt man also  $R_{13}$  zu 110  $\Omega$ , so bedeutet dies, daß der Flächenwiderstand der dünnen Schicht 1 etwa 10 Milliohm beträgt; mißt man dagegen 11 M $\Omega$ , so ist der Flächenwiderstand  $R_{\square}$  bzw. 6 der dünnen Schicht 1 etwa 1 K $\Omega$ .

In der Fig. 3 ist das Ersatzschaltbild des Schwingkreises 3 im Falle der Resonanz dargestellt. Mit der Bezugsszahl 16 ist hierbei der Kreiswiderstand bezeichnet.

In der Fig. 4 ist dargestellt, wie die wesentlichen Ele-

mente der Schaltungsanordnung gemäß Fig. 2 bei einer Vorrichtung angebracht sind, die eine Meßwalze 20 aufweist, über die eine Bahn 21 abrollt, welche die zu messende dünne Schicht 1 trägt. Die Sensoren, welche jeweils aus einer Spule 2 und den zugehörigen elektronischen Bauteilen bestehen, sind in die Oberfläche dieser Meßwalze 20, z. B. an den Stellen 22, 24, 25 eingelassen. Hierdurch ist gewährleistet, daß jeder Sensor bei einer Umdrehung der Walze 20 einmal ein Nullsignal abgibt — nämlich dann, wenn die Bahn 21 nicht an der Spule anliegt — und einmal ein Meßsignal, wenn die Bahn 21 anliegt.

Die zu messende Schicht 1 auf der Bahn 21 befindet sich in einem genau zu reproduzierenden Abstand zur Spule, der sich z. B. aus 2 mm Abdeckung des Sensors zuzüglich der Stärke der Trägerfolie 21 zusammensetzt. Der Einfluß einer eventuellen Abweichung der Dicke der Folie 1 gegenüber der konstanten Dicke von 2 mm kann auf diese Weise vernachlässigt werden.

An einer Welle 26 der Meßwalze 20 sind noch Positionsgeber 33, 36 angebracht, die bewirken, daß in der Auswerte-Schaltung das Nullsignal  $U_{1(0)}$  bis  $U_{3(0)}$  und das Meßsignal  $U_1$  bis  $U_3$  auf zwei Speicher geschaltet werden. Die Differenz der beiden Signale  $U_R - U_{R(0)}$  ist, wie bereits oben erwähnt, eine nur von den Schichteigenschaften abhängige Spannung, die zur Schicht-Leitfähigkeit proportional ist. Hierdurch wird die Nullpunktdrift beseitigt, die bei derartigen Sensoren oft tausendfach höher ist als das Meßsignal. Dies ist insbesondere beim Einsatz in Vakuumanlagen günstig, wo die Prozeßkammer meist mehrere Stunden nicht geöffnet werden kann.

Der Abgriff der Spannungen  $U_1$  bis  $U_3$  erfolgt über die an der Welle 26 sitzenden Schleifringe 23, 27, 28. Diese Spannungen werden einer Verarbeitungseinrichtung 29 zugeführt und über Anzeigevorrichtungen 30, 31, 32 angezeigt. Die Anzeigevorrichtungen können hierbei 10-Volt-Zeigerinstrumente sein, bei denen z. B. ein Ausschlag von 1 V  $\triangleq$  100  $\Omega$  und 10 V  $\triangleq$  10  $\Omega$  bedeutet. Die Werte werden außerdem zu einem nicht dargestellten Anlagen-Rechner gegeben, der auch die  $\Omega$ -Werte errechnet und in ein Anlagen-Schaubild auf einem Bildschirm zur Darstellung bringt. Für die Erfassung der Winkelstellungen der Welle 26 können handelsübliche induktive, kapazitive oder optische Geber 33, 36 eingesetzt werden, durch die eine mit Aussparungen 34 versehene Scheibe 35 rotiert. Die Geber 33, 36 führen der Verarbeitungseinrichtung 29 Synchronisationsimpulse 18, 19 zu. Der Geber 33 liefert hierbei z. B. die Zeiten für die Meßvorgänge I, II, III, während der Geber 36 die Zeiten für die Nullvorgänge I, II, III liefert.

In der Fig. 5 ist ein erfindungsgemäßer Sensor im vergrößerten Maßstab dargestellt. Die Spule 2 befindet sich hierbei unmittelbar unterhalb einer Abdeckung 37, die etwa eine Dicke von 2 mm hat. Die elektronische Schaltungsanordnung 38, mit der die Spule 2 verbunden ist und die in der Fig. 6 noch näher beschrieben wird, befindet sich auf einer Platine 39, die über einen Kopppler 78 mit einem 20poligen Flachbandkabel 89 in Verbindung steht. Über dieses Flachbandkabel 89 erfolgt die Stromversorgung und Fernsteuerung.

In der Fig. 6 ist eine Schaltungsanordnung im Detail dargestellt, welche die gesamte Elektronik eines Sensors sowie Auswerteschaltungen 9, 29 zeigt. Auf der linken Seite eines Trennungsstrichs 150 befindet sich die Elektronik 38 des Sensors, während rechts von diesem Strich ein Schleifringübertrager (nicht dargestellt) und die Auswerteschaltungen 9, 58 dargestellt sind.

Die Anzapfung 40 der Spule 2 ist auf einen Vorverstärker 41 gegeben, dem ein Anpassungstransformator 42 nachgeschaltet ist. Die Ausgangsspannungen dieses Anpassungstransformators 42 sind auf den Verstärker 56 geführt, der das Ausgangssignal des Transformators 42 um den Faktor 1000 verstärkt. Das derart verstärkte Signal wird auf eine Kapazitätsdiode 43 gegeben, die über einen Kondensator 105 die Frequenz des Oszillators 7 auf die Resonanz des Sensor-Schwingkreises nachregelt. Der Anschlußpunkt 135 des Kondensators 105 ist hierfür mit dem Kondensator 65 des Oszillators 7 verbunden.

Parallel zur Spule 2 sind der Kondensator und ein Widerstand 138 geschaltet, während parallel zur Spule 2 und zum Kondensator 4 über die Schalter 10, 45 Eichwiderstände 11, 44 schaltbar sind. Die Schalter 10, 45 werden hierbei über Inversionsgatter 46, 47 aus der Steuerung 9 gesteuert. Aus dieser Steuereinrichtung 9 werden auch zwei weitere Gatter 48, 49 angesteuert, die Schalter 50, 51 beaufschlagen, mit denen Widerstände 52, 53, 54 kurzgeschlossen werden können. Die Inverter 46 bis 49 sind zusammen mit den Schaltern 51, 52 in handelsüblichen Schalterbausteinen enthalten. Hierdurch ist es möglich, den Verstärkungsgrad des Vorverstärkers 8, auf den das gleichgerichtete Stromsignal des Parallelschwingkreises 3 gegeben wird, stufig zu verstellen. Über einen Spannungs-Strom-Wandler 57 wird das Ausgangssignal des Vorverstärkers 8 über einen Schleifringübertrager 23, 27, 28 (Fig. 4) zur Auswerteeinrichtung 29 und von dort auf eine Anzeigeeinrichtung gegeben. Der Oszillator 7, dessen Ausgangsspannung der Spule 2 zugeführt wird, enthält eine Induktivität 59, der zwei Kondensatoren 60, 61 parallelgeschaltet sind, wobei in Serie zu den Kondensatoren 60, 61 und zur Spule 59 ein Transistor 62 liegt. Parallel zu dem Kondensator 60 ist ein abstimmbarer Kondensator 65 geschaltet, der mit einem Widerstand 140 und mit dem Emitter des Transistors 62 verbunden ist. Die Basis dieses Transistors 62 ist an einen Spannungsteiler gelegt, der zwei Widerstände 63, 64 aufweist. Parallel zu diesem Spannungsteiler ist ein Kondensator 106 geschaltet.

Über einen Kondensator 107 und einen Widerstand 108 ist von dem Emitter des Transistors 62 eine Verbindung zu dem Schwingkreis 3 gelegt. Außerdem führt von diesem Emitter über einen Widerstand 66 eine Verbindung zu einer Phasen-Nachregelanordnung 14, die einen 90°-Phasenschieber 147 aufweist, der aus vier Kondensatoren 72, 73, 71, 69 und zwei Widerständen 66, 68 besteht. Der Widerstand 70 bildet hierbei mit einem weiteren Widerstand 67 einen Spannungsteiler vor der Basis eines Transistors 76, dessen Emitter auf ein RC-Glied 74, 77 geschaltet ist.

Der Parallelschwingkreis 3 ist auch mit dem Vorverstärker 41 verbunden, der einen Transistor 82 enthält, welcher mit drei Widerständen 79, 80, 83 und einem Kondensator 81 beschaltet ist. Das Ausgangssignal dieses Vorverstärkers 41 ist über einen Kondensator 84 auf die Primärwicklung 86 eines Transformators 85 gegeben, dessen Sekundärwicklung 87 eine Mittenanzapfung 88 besitzt. Zu dieser Mittenanzapfung führt eine Verbindung über einen Widerstand 75 auf den Kondensator 77 der Phasen-Nachregelanordnung 14. Die Gesamtspannung an der Sekundärwicklung 87 wird nach Gleichrichtung durch Dioden 146, 90 und nach Glättung durch Kondensatoren 91, 92 über Widerstände 93, 94 auf die erste Stufe des zweistufigen Verstärkers 56 gegeben, die aus einem mit Widerständen 96, 97 beschalteten Operationsverstärker 95 besteht. Die Ausgangsspannung des

Operationsverstärkers 95 wird sodann über einen Widerstand 98 auf den einen Eingang eines zweiten Operationsverstärkers 99 gegeben, dessen zweiter Eingang über einen Widerstand 100 an Masse liegt. Im Rückkopplungszweig dieses Operationsverstärkers 99 befindet sich eine aus einem Kondensator 103 und einem Widerstand 102 bestehende Parallelschaltung. Das Ausgangssignal des Operationsverstärkers 99 ist über Widerstände 101, 104 auf die Kathode einer Kapazitätsdiode 43 sowie auf einen Kondensator 105 gegeben, welcher mit dem Kondensator 65 des Oszillators 7 verbunden ist.

Der zum Parallelschwingkreis 3 fließende Strom  $i_1$  erzeugt am Widerstand 108 eine Spannung, die über Dioden 109, 134 gleichgerichtet, durch Kondensatoren 110, 133 geglättet und über einen Kontakt 111 sowie über Widerstände 112, 115, 116 dem Vorverstärker 8 zugeführt wird, der die Spannung proportional verstärkt. Dem Kondensator 133 ist ein Widerstand 132 parallelgeschaltet. An den Verbindungspunkt der Widerstände 112, 115 ist ein Widerstand 114 gelegt, der an Masse liegt. Der Widerstand 116 liegt ebenfalls über einen weiteren Widerstand 117 an Masse. Von dem einen Eingang des Vorverstärkers 8 führt über einen Widerstand 119 eine Verbindung auf einen Spannungsteiler. Der Vorverstärker 8 enthält einen Operationsverstärker 124, in dessen Rückkopplungszweig ein Widerstand 122 mit einem hierzu parallelgeschalteten Kondensator 123 liegen. Die Eingänge dieses Operationsverstärkers 124 sind an Widerstände 120, 121 angeschlossen, von denen der Widerstand 120 mit dem Ausgang des Operationsverstärkers 118 verbunden ist und der Widerstand 121 an Masse liegt. Die Rückkopplung 122, 123 des Operationsverstärkers 124 ist über einen Widerstand 130, ein RC-Glied 129, 128 und eine Induktivität 127 mit der Auswerteschaltung 29 verbunden. Die vom Vorverstärker 8 verstärkte Spannung wird auf einen Spannungs-Strom-Wandler 57 gegeben, der über Schleifringe (Fig. 4) und eine Auswerteschaltung 29 eineanzeigeeinheit ansteuert. Die Induktivitäten 126, 127 des Wandlers 57 sorgen dafür, daß keine Hochfrequenz aus dem Sensor nach außen dringt und daß der Sensor nicht von einer äußeren Hochfrequenz gestört werden kann.

Die Ausgangsspannung des Vorverstärkers 8 kann hierbei durch Zu- und Abschalten verschiedener Widerstände 52 bis 55 an einen Operationsverstärker 118 verändert werden.

Bei dem Element 113 handelt es sich um einen 12-Volt-Stabilisator, der die Spannungsschwankungen ausgleicht, die beispielsweise über die Stromversorgungsleitung 149 ankommen.

Ein Meßvorgang mittels der beschriebenen Einrichtung erfolgt beispielsweise derart, daß zunächst der Schwingkreis 3 auf Resonanz abgestimmt wird. Nimmt man nun an, daß sich über der Induktivität 2 gerade keine zu messende Schicht 1 befindet, so gibt der Geber 36 ein Signal 18 "Nullen" an die Auswerteschaltung 29. Die Frequenz der Spannung  $U_1(t)$  sei zu diesem Zeitpunkt 1800 KHz. In einem Speicher der Auswerteschaltung 9 wird dieser Spannungswert abgespeichert. Nähert sich hierauf die Induktivität 2 aufgrund der Drehung der Walze 20 der zu messenden Schicht 1, so wird mit einer Zeitkonstanten von einigen  $10^{-3}$  Sekunden jede Blindkomponente im Schwingkreis 3 ausgeregelt. Befindet sich die zu messende Schicht 1 direkt über der Induktivität 2, so gibt der Positionsgeber 33 ein Signal 19 "Messen" an die Auswerteschaltung 29. Die Span-

nung  $U_1$ , deren Frequenz jetzt 1820 KHz sei, wird in der Auswerteschaltung 29 gespeichert. Jetzt wird die Differenz  $U_1 - U_1(0)$  gebildet, die dem Flächenleitwert bzw. dem reziproken Flächenwiderstand  $\frac{1}{R_Q}$  proportional ist.

#### Patentansprüche

1. Einrichtung zum zerstörungsfreien Messen des ohmschen Widerstands dünner Schichten nach dem Wirbelstrom-Prinzip, wobei eine Induktivität mit Wechselstrom beaufschlagt wird, deren Magnetfeld in den dünnen Schichten einen Wirbelstrom erzeugt, dessen Magnetfeld das ursprüngliche Magnetfeld der Induktivität schwächt, dadurch gekennzeichnet, daß die Induktivität (2) mit einer Kapazität (4) einen Schwingkreis (3) bildet und dieser Schwingkreis (3) stets auf Resonanz gehalten wird.
2. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Resonanz des Schwingkreises (3) durch Nachregelung der Frequenz des diesen Schwingkreis speisenden Wechselstroms ( $i_1$ ) hergestellt wird.
3. Einrichtung nach den Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß für die Erzeugung des Wechselstroms ein Hochfrequenzgenerator (7) vorgesehen ist, dessen Frequenz mittels einer Phasen-Nachregelanordnung (14) auf die jeweilige Resonanzfrequenz des Schwingkreises (3) eingestellt wird.
4. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwingkreis ein Parallelschwingkreis (3) ist.
5. Einrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Parallelschwingkreis (3) wenigstens eine diskrete Spule (2) und einen diskreten Kondensator (4) enthält.
6. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zu dem Schwingkreis (3) ein Widerstand (11) schaltbar ist.
7. Einrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Zuschaltung des Widerstands (11) fernbedienbar erfolgt.
8. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Induktivität (2) eine Abdeckung (37) aufweist und derart in eine Walze (20) eingebaut ist, daß die Oberfläche dieser Abdeckung (37) mit der Oberfläche dieser Walze (20) bündig ist, wobei die zu messende dünne Schicht (1) über die Walze (20) und auf einer Trägerfolie (21) bewegt wird.
9. Einrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die zu messende dünne Schicht (1) auf der Trägerfolie (21) aufgedampft ist, die über die Walze (20) geführt wird.
10. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Verstärker (8) vorgesehen ist, der den zum Schwingkreis (3) fließenden Strom ( $i_1$ ) verstärkt.
11. Einrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß dem Verstärker (8) ein Spannungs-Stromwandler (57) nachgeschaltet ist.
12. Einrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Verstärkungsgrad des Verstärkers (8) über mehrere Widerstände (52 bis 55) stufschaltbar ist.

13. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwingkreis (3) mit einem Vorverstärker (41) verbunden ist, der einen Transformator (42) speist, dessen Sekundärwicklung (87) eine Mittenzapfung (88) besitzt, die an einen 90°-Phasenschieber (147) angeschlossen ist. 5
14. Einrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Phasen-Nachregelanordnung (14) aus einem 90°-Phasenschieber (147), einem Vorverstärker (41), einem Transformator (42), einem Verstärker (56), einer Kapazitätsdiode (43), einem Widerstand (104) und einem Kondensator (105) besteht. 10
15. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Speicher vorgesehen sind, von denen der eine Speicher ein Nullsignal und der andere Speicher ein Meßsignal speichert, und daß die Differenz der beiden Signale als Maß für den Widerstand der zu messenden dünnen Schicht (1) dient. 15 20
16. Einrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß für Eichzwecke die dünne Schicht (1) durch ein Material mit bekanntem Flächenwiderstand gebildet wird.
17. Einrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Eichung im Vakuum erfolgt und eine Simulation einer Widerstandsschicht durchgeführt wird, indem ein Widerstand (11) mit bekanntem Wert zum Schwingkreis (3) ferngesteuert parallel geschaltet wird. 25 30
18. Einrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Eichung dann erfolgt, wenn der Sensor gerade ein Nullsignal liefert.
19. Einrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Induktivität (2) mit einer elektronischen Schaltungsanordnung (38) verbunden ist, die sich auf einer Platine (39) innerhalb eines Gehäuses (148) befindet, das eine Abdeckung (37) aufweist und über Steckkontakte (78) mit einem Flachbandkabel (89) verbunden ist. 35 40
20. Verfahren zum Messen des Widerstands einer dünnen Schicht und eine Einrichtung gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei auf Resonanz abgestimmtem Schwingkreis (3) die Induktivität (2) nicht einer zu messenden Schicht (1) gegenüberliegt und ein Positionsgeber (33, 36) ein Nullsignal auf die Auswerteschaltung (29) gibt, wo das entsprechende Nullsignal gespeichert wird, daß bei Annäherung der Induktivität (2) an die zu messende Schicht (1) die Blindkomponente des Schwingkreises (3) mit kleiner Zeitkonstante ausgeregelt wird und daß dann, wenn die zu messende Schicht (1) direkt über der Induktivität (2) liegt, von einem Positionsgeber (33, 36) das Signal "Messen" an die Auswerteschaltung (29) gegeben und gespeichert wird und daß die Differenz zwischen dem Meßsignal und dem Nullsignal gebildet und angezeigt wird. 45 50 55

3815009

Nummer:  
Int. Cl.4:  
Anmeldetag:  
Offenlegungstag:

38 15 009  
G 01 R 27/02  
30. April 1988  
9. November 1989

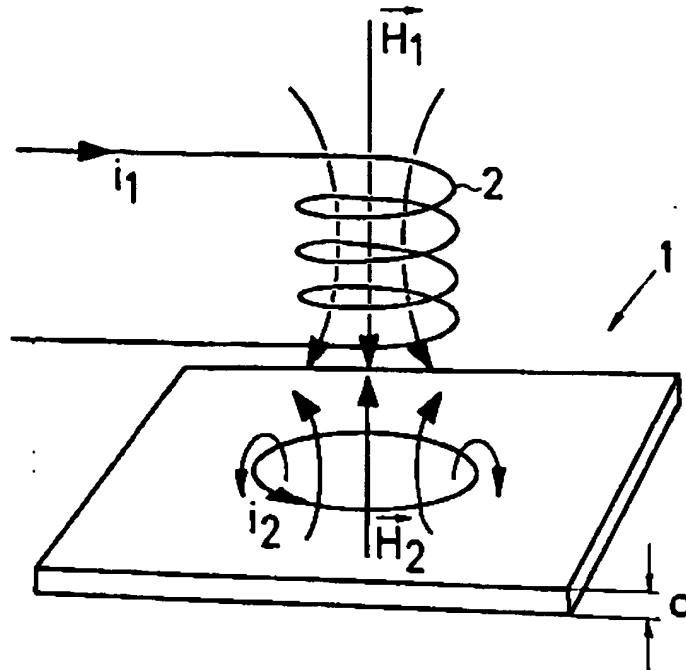


FIG. 1

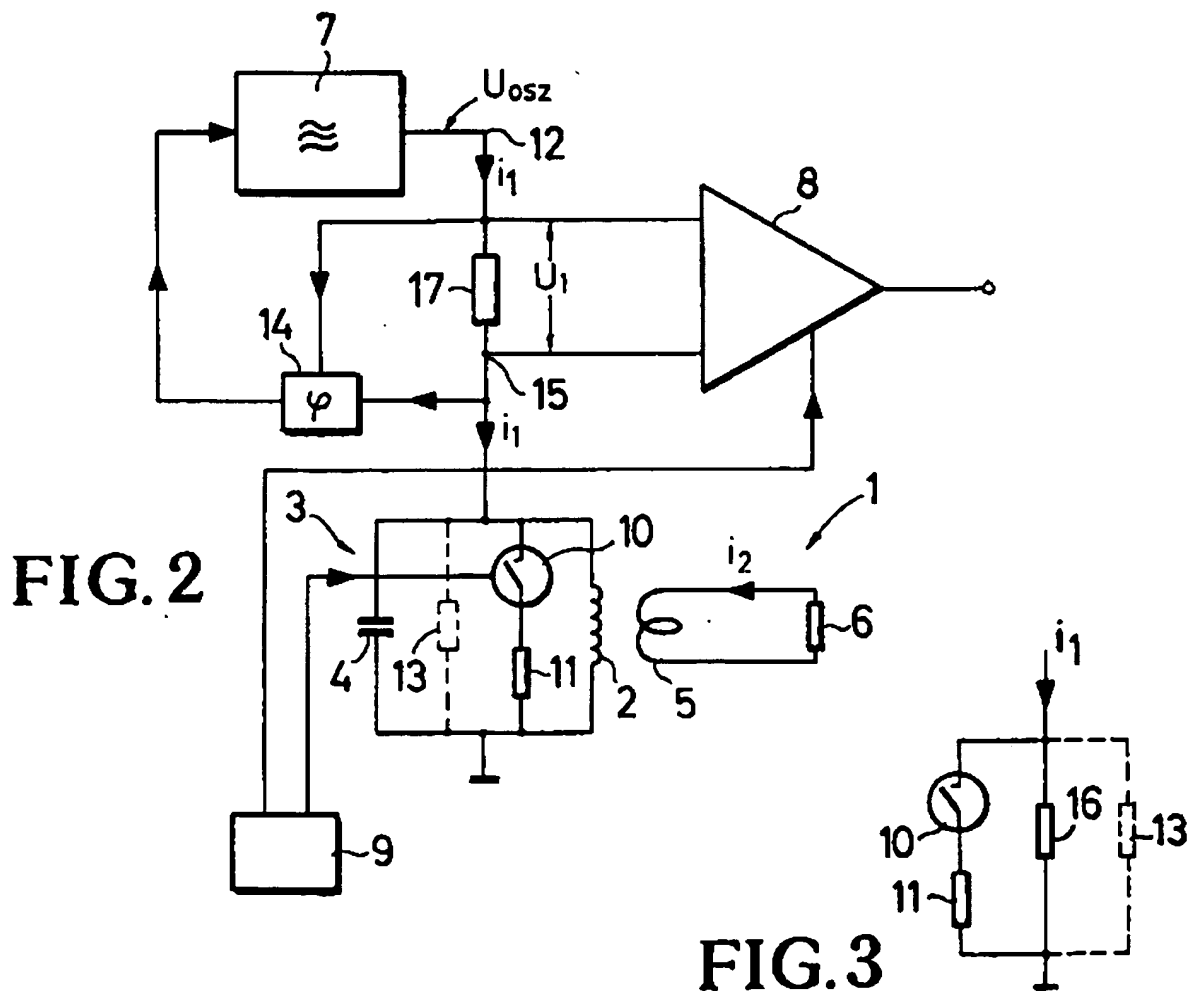
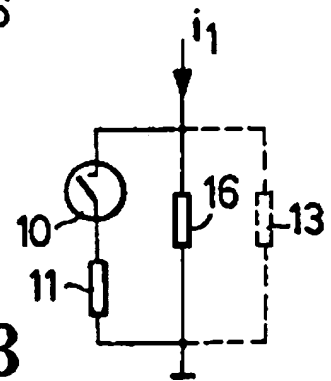


FIG. 2

FIG. 3





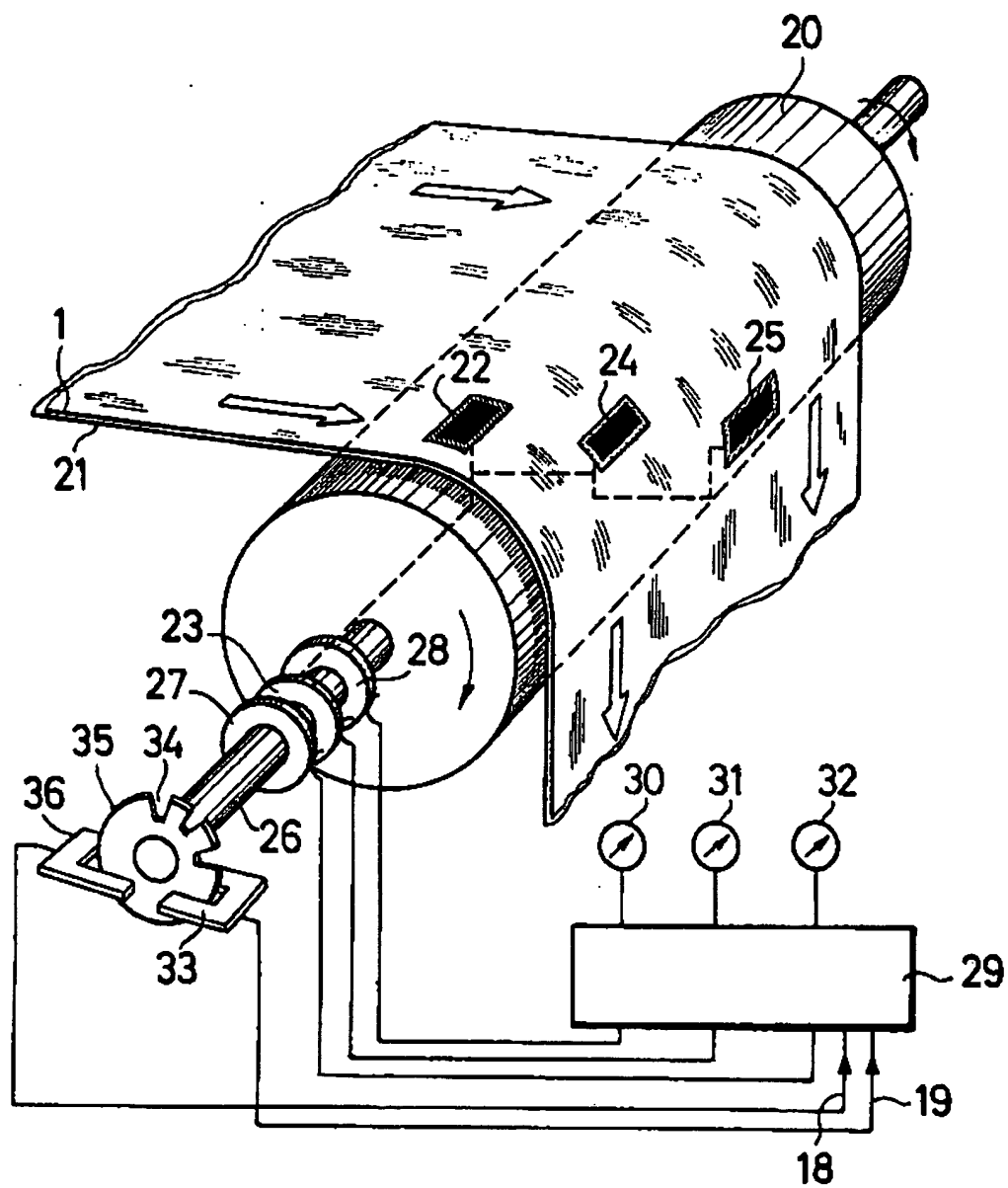


FIG. 4

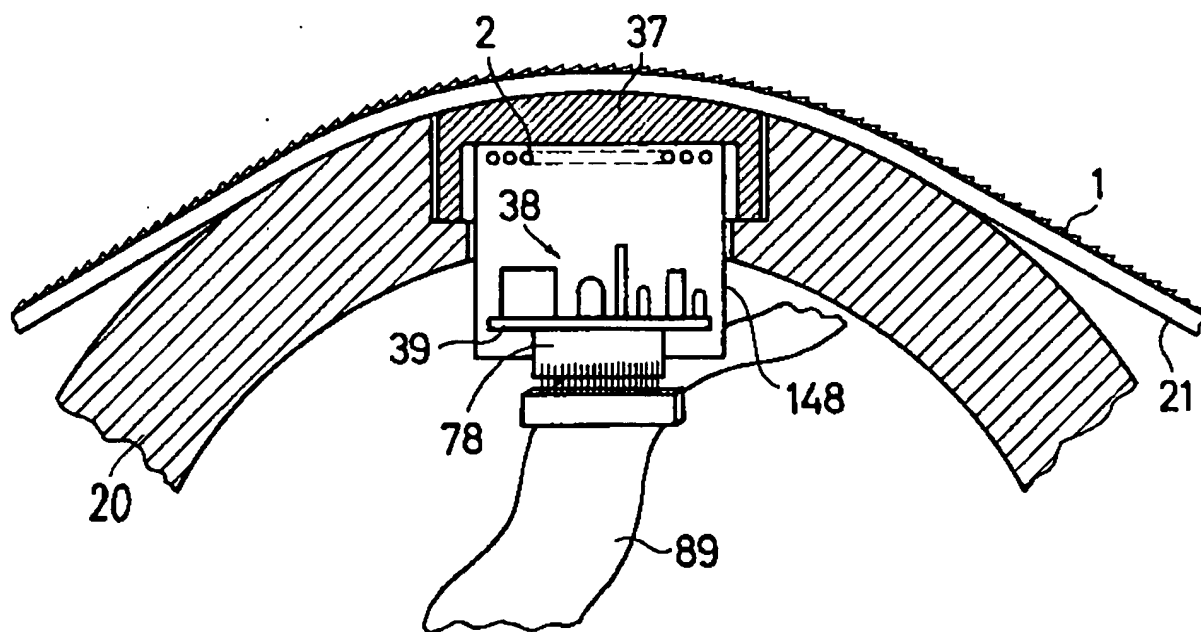


FIG. 5

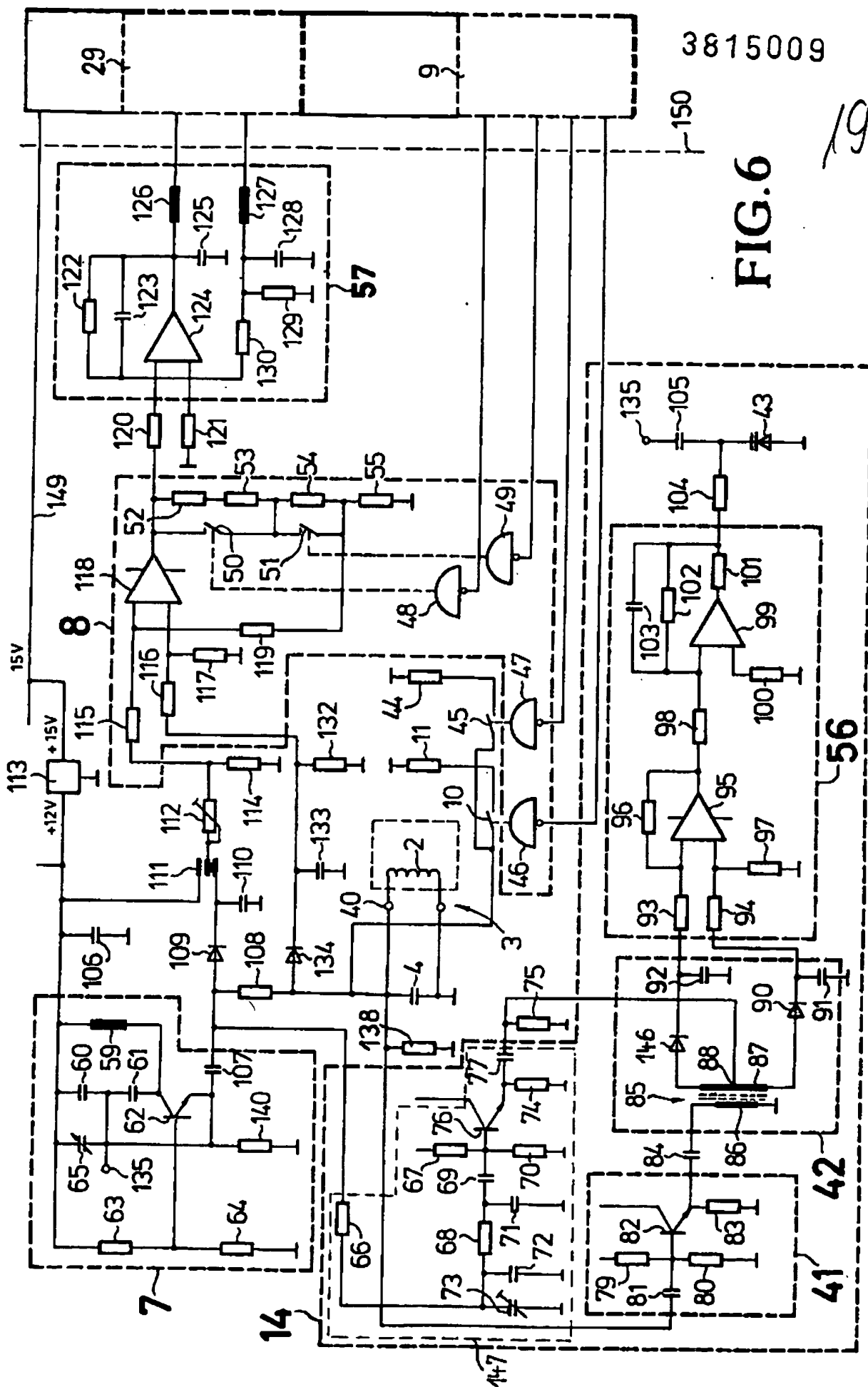


FIG. 6

3815009

19\*



Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zum zerstörungsfreien Messen des ohmschen Widerstands dünner Schichten nach dem Wirbelstrom-Prinzip.

Bei der Messung von Eigenschaften dünner Schichten besteht ein Problem darin, daß diese Schichten durch den Meßvorgang infolge Berührung oder Kontaktierung beschädigt oder zerstört werden können. Besonders unangenehm ist es, wenn bei der Messung des elektrischen Widerstands einer dünnen Schicht diese Schicht durchgedrückt, zerkratzt oder verunreinigt wird.

Um diese Nachteile zu vermeiden, wurden bereits eine Reihe von Meßverfahren entwickelt, die Sensoren aufweisen, welche berührungslos arbeiten. So ist beispielsweise eine kapazitiv arbeitende Vorrichtung zur Messung der Schichtdicke eines Metallbelags auf einer Isolierstoffbahn bekannt, welche die Leitfähigkeit dieses Belags ohne mechanische Berührung mißt (DE-GM 68 10 362). Bei dieser Vorrichtung dienen zur Führung der Isolierstoffbahn und gleichzeitigen Messung der Leitfähigkeit ihres Metallbelags drehbare Walzen, die als Kondensatorplatten für die kapazitive Ankopplung eines Widerstandsmeßgeräts wirken.

Bei einem weiteren bekannten kapazitiven Meßverfahren werden zur elektrischen Messung von Schichtdicken an laufenden Bändern in Vakuum-Beschichtungsanlagen eine Umlenkwalze und mehrere Sensoren mit örtlich begrenztem Meßbereich eingesetzt (DE-OS 33 35 766). Hierbei sind die Sensoren an der Oberfläche der Umlenkwalze verteilt angeordnet und durch eine Übertragungseinrichtung mit einer Auswerteschaltung verbunden.

Neben diesen kapazitiven Verfahren, die hauptsächlich zum Messen des Widerstands von hochohmigen Schichten geeignet sind, sind auch noch induktive Verfahren vorgeschlagen worden, die sich mehr für die Widerstandsmessung bei niederohmigen Schichten eignen. Beispielsweise ist eine Anordnung zur berührungslosen Messung der Dicke elektrisch leitfähiger Schichten bekannt, bei der eine Induktionsspule mit einem Wechselspannungsgenerator und einer Meßeinrichtung für die Erfassung des Induktivitätswertes der Induktionsspule vorgesehen sind (DE-OS 23 45 849). Hierbei ist der Induktionsspule gegenüber unter Belassung eines Luftspalts eine zweite Induktionsspule gleicher Auslegung angeordnet. Die Stromrichtungen sind in beiden Spulen gleich, und ihre Ausgangssignale werden additiv der Meßeinrichtung aufgeschaltet.

Es ist weiterhin ein Verfahren zur zerstörungsfreien Messung der Einzeldicken von Schichtsystemen nach dem Wirbelstromverfahren bekannt, bei dem Meßsonden mit einer komplexen Impedanz eingesetzt werden, deren Realteil und Imaginärteil je für sich Informationen über zwei zu messende Schichtdicken eines Schichtsystems enthalten können (A. Ott: "Zerstörungsfreie Messung der Einzeldicken von Schichtsystemen nach dem Wirbelstrom-Verfahren", Zeitschrift für Werkstofftechnik, Heft 6, 1975, Seiten 188 bis 194). Ein Nachteil dieser bekannten Meßvorrichtung besteht darin, daß nur relativ dicke Schichten, z. B. Aluminium von 1 µm ... 1000 µm, gemessen werden können und daß sie nicht sehr empfindlich ist.

Ferner ist ein Verfahren zum berührungslosen Messen der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit eines Plättchens bekannt, bei der ein Schwingkreis-Sensor als

Gabelaufnehmer vorgesehen ist und die Feldführung durch Ferritkerne erfolgt (DE-OS 26 36 999). Dieses Verfahren ist jedoch nicht für die Messung an großen Flächen geeignet.

Bei einem anderen Verfahren zum elektrodenlosen Bestimmen des spezifischen elektrischen Widerstands eines Prüflings mit Hilfe eines aus Spule und Kondensator bestehenden Resonanzkreises wird die Energie dieses Resonanzkreises erfaßt, die dieser in An- und Abwesenheit des Prüflings führt, wobei der Prüfling im elektrischen Feld des Kondensators, vorzugsweise nacheinander im Feld von Spule und Kondensator, bewegt wird (DE-PS 13 01 858). Dieses Verfahren ist jedoch ebenfalls nicht für die Messung an großen Proben-Flächen geeignet, weil die Proben entweder durch die Spule des Resonanzkreises hindurchgezogen oder an einem Kondensator vorbeigeführt werden müssen.

Bei einem bekannten Wirbelstrom-Prüfgerät wird eine Spule an ein Prüfobjekt gekoppelt, um in diesem Wirbelströme zu induzieren, durch welche wiederum Spannungen in dieser Spule induziert werden (DE-OS 30 22 078). Dieses Wirbelstrom-Meßgerät arbeitet mit verschiedenen Frequenzen, so daß der Sensor keinen Resonanzkreis und keine Frequenznachführung aufweist.

Schließlich ist ein weiteres Wirbelstrom-Meßverfahren bekannt, bei dem ein Schwingkreis eingesetzt wird, der eine Prüfspule und einen Kondensator aufweist und bei dem ein spannungsgesteuerter Oszillator in der Frequenz so nachgesteuert wird, bis der Resonanzzustand erreicht ist (DD-PS 2 24 946). Dieses Meßverfahren ist jedoch wegen seiner Empfindlichkeit auf Laboranwendungen beschränkt, wo es vertretbar ist, vor jeder Messung den Nullpunkt und die Eichung nachzustellen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein geeignetes Verfahren und eine Einrichtung mit einem Wirbelstrom-Sensor der vorstehend beschriebenen Art für den industriellen Einsatz z. B. in Bandbeschichtungsanlagen zu schaffen.

Diese Aufgabe wird für das Verfahren gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 1 und für die Einrichtung gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 2 gelöst.

Der mit der Erfindung erzielte Vorteil besteht insbesondere darin, daß sich bei Messungen in Vakuumanlagen, die beispielsweise acht Stunden nicht geöffnet werden, über den ganzen Zeitraum praktisch keine Ungenauigkeiten ergeben. Außerdem kann die induktiv arbeitende Einrichtung mit einer Auswerteschaltung zusammenwirken, die auch für kapazitiv arbeitende Meßeinrichtungen geeignet ist. Hierdurch ist es möglich, den elektrischen Widerstand hochohmiger und niederohmiger Schichten über kapazitive und induktive Meßeinrichtungen durch dieselbe Auswerteeinrichtung auswerten zu lassen. Der gemessene Widerstandswert bezieht sich in der Regel auf eine rechteckige oder quadratische Fläche. Unter der Voraussetzung, daß die zu messende Schicht metallisch dicht ist und die üblichen Festkörperwerte gelten, z. B. der spezifische Widerstand, kann aus dem gemessenen Flächenwiderstand stets auf die Dicke  $a$  der Schicht geschlossen werden, für die dann

$$a = K \frac{1}{R_{\text{Fläche}}}$$

gilt.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der

Zeichnung dargestellt und wird im folgenden näher beschrieben. Es zeigt

Fig. 1 eine Prinzipdarstellung eines induktiven Sensors für die Messung eines niederohmigen Flächenwiderstands;

Fig. 2 eine Schaltungsanordnung zum Messen eines Flächenwiderstands;

Fig. 3 einen in der Schaltungsanordnung gemäß Fig. 2 enthaltenen Schwingkreis im Falle der Resonanz;

Fig. 4 eine Vorrichtung, in welcher der erfindungsgemäße Sensor zur Anwendung kommt;

Fig. 5 einen induktiven Sensor in der Vorrichtung gemäß Fig. 4 im vergrößerten Maßstab;

Fig. 6 eine detaillierte Schaltungsanordnung für die Messung eines Widerstands nach dem Wirbelstrom-Prinzip.

In der Fig. 1 ist das Prinzip der Erfassung des Widerstandswertes einer dünnen Schicht 1 dargestellt. Unter einer dünnen Schicht werden im folgenden alle Schichten verstanden, die nicht mehr aus einzelnen Inseln bestehen. Bei Metallen trifft dies bei mehr als 3 bis 5 Atomlagen zu. Der Meßbereich bei Aluminium bewegt sich z. B. zwischen 1 nm und 1 µm. Über der Schicht 1 befindet sich eine Spule 2, die von einem Wechselstrom  $i_1$  durchflossen wird. Aufgrund dieses Stroms  $i_1$  bildet sich ein Wechsellmagnetfeld  $\vec{H}_1$  im Innern der Spule aus, das in der dünnen Schicht 1 einen Wirbelstrom  $i_2$  verursacht, der seinerseits ein Magnetfeld  $\vec{H}_2$  erzeugt, der das Magnetfeld  $\vec{H}_1$  schwächt. Man spricht hierbei von einer Feldverdrängung (K. Küpfmüller: Einführung in die theoretische Elektrotechnik, 11. Auflage, S. 304 ff.). Der Grad der Schwächung des Magnetfelds  $\vec{H}_1$  läßt einen Rückschluß auf den Flächenwiderstand  $R_{\square}$  der Schicht 1 zu. Der funktionelle Zusammenhang zwischen Strom  $i_1$  und dem Widerstand  $R_{\square}$  der Schicht ist in erster Näherung

$$i_1 \sim \frac{1}{R_{\square}}.$$

Hierbei wird vorausgesetzt, daß es sich bei den zu messenden Schichten um Schichten mit einer sehr geringen Schichtdicke  $a$  im Vergleich zur sogenannten Eindringtiefe  $\delta$  handelt, wobei

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \kappa}}$$

( $\omega$  = Kreisfrequenz,  $\mu$  = Permeabilität,  $\kappa$  = Leitfähigkeit).

Eine Schaltungsanordnung, mit welcher auf einfache Weise der Flächenwiderstand ermittelt werden kann, ist in der Fig. 2 dargestellt.

Die als Meßsonde dienende Spule 2 ist hier ein Teil eines Parallelschwingkreises 3, in dem sich ein Kondensator 4 befindet. Die zu messende dünne Schicht 1 ist in einem Ersatzstromkreis als Spule 5 mit einer Windung dargestellt, die parallel zu einem ohmschen Widerstand 6 liegt. Der Parallelschwingkreis ist an einen Oszillator 7 angekoppelt, der beispielsweise auf einer Frequenz von 1,8 MHz schwingt und dessen Ausgangsspannung  $U_{osz}$  konstant ist. Die Ankopplung erfolgt hierbei über einen Widerstand 17, der als Fühler für den Strom  $i_1$  dient und dessen Spannungsabfall einem Vorverstärker 8 zugeführt ist. Die zwischen dem Oszillator 7 und dem Paral-

lellschwingkreis 3 sich ergebende Phasendrift ist über eine Phasen-Nachregelanordnung 14, die auf  $\cos \varphi = 1$  entsprechend  $\varphi = 0$  regelt, auf den Oszillator 7 rückgeführt. Die Phasen-Nachregelanordnung 14 regelt also die Phasendifferenz zwischen  $U_{osz}$  und  $U_{sensor}$  auf Null, d. h. den  $\cos \varphi$  des Verbrauchers auf 1. Die Bezugsspannung, bei der  $\varphi = 0$  ist, befindet sich am Punkt 12. Ohne Nachregelung wäre am Punkt 15  $\varphi \neq 0$ . Bei einer Nachregelung können jedoch die Spule 2 und der Kondensator 4 außer Betracht bleiben. Wenn der Parallelschwingkreis 3 in Resonanz ist, sind alle Blindelemente kompensiert, und die Hochfrequenzspannung des Sensors hat die gleiche Phasenlage wie die Spannung  $U_{osz}$ . Unter dieser Voraussetzung wird der Widerstand  $R_{\square}$  der dünnen Schicht 1 rein ohmsch in den Parallelschwingkreis 3 als Widerstand 13 herübertransformiert, weil die über Luft gekoppelten Spulen 2, 5 einen Transformator bilden.

Parallel zu der Spule 2 kann über eine externe Steuereinrichtung 9 und über einen Schalter 10 ein Eichwiderstand 11 geschaltet werden. Auf einen Kalibrierbefehl hin wird der Eichwiderstand 11 zugeschaltet, der eine Normalbelastung simuliert. Die Steuereinrichtung 9 steuert auch noch den Vorverstärker 8 an und verstellt dessen Verstärkungsgrad stufig. Zusammen mit einer in einer Auswertung befindlichen Feinverstellung wird darauf eine Anzeige auf einen Eichpunkt eingestellt. Hierdurch ist die Anordnung von der Spule 2 bis zur Anzeige am Ausgang der Auswertung geeicht, d. h. die Steilheit hat einen bestimmten Wert. Die fernbedienbare Verstellung der Verstärkung des Vorverstärkers 8 ist deshalb sehr wichtig, damit bei hohen Empfindlichkeiten ein möglichst großer Anteil der Gesamtverstärkung des Meßsystems in den nullpunktkompensierten Vorverstärker 8 gelegt werden kann. Andernfalls würde der Nullpunktfehler entsprechend dem Meßsignal mitverstärkt. Die Nullpunktkompensation erfolgt im einzelnen dadurch, daß die Drift des Vorverstärkers 8 im Sensor und auch die Widerstandsdrift der Spule 2 durch Nullen und Messen beseitigt werden. Dies geschieht z. B. dadurch, daß zwei Speicher vorgesehen sind, von denen der eine Speicher ein Nullsignal und der andere Speicher ein Meßsignal speichert, wobei die Differenz der beiden Signale als Maß für den Widerstand der zu messenden dünnen Schicht 1 dient.

Die Widerstandswerte einer dünnen Schicht 1, die mit der Anordnung nach Fig. 2 gemessen werden können, liegen vorzugsweise zwischen 10 Milliohm und 1 Kiloohm.

Der Strom  $i_1$ , der bei Resonanz des Parallelschwingkreises 3 über den Widerstand 17 fließt, wird durch den ohmschen Widerstandswert bestimmt, der sich durch die Transformation des Widerstands  $R_{\square}$  (-6) in den Parallelschwingkreis 3 ergibt, d. h. die am Eingang des Vorverstärkers 8 anstehende Spannung  $U_1$  ergibt sich zu  $R_{17} \times i_1$ , wobei

$$i_1 = \frac{U_{osz}}{R_{17} + R_{13} || R_{16}}$$

gilt.

Mit  $R_{16}$  ist hierbei der Verlustwiderstand des Kreises bezeichnet, der in der nachfolgenden Fig. 3 dargestellt ist.

$R_{17}$  und  $R_{16}$  sind konstant, während  $R_{13}$  variabel ist, und zwar zwischen einem Widerstandswert Unendlich beim "Nullen" und einem Wert  $K \times R_{\square}$  beim Messen.

Da  $R_{13} \gg R_{17}$  ist, liegt praktisch  $U_{osz} = \text{const.}$  am Kreis an:

$$\Delta i_1 \sim \frac{1}{\Delta R_{13}}.$$

Der Strom  $i_1$  ist somit umgekehrt proportional zu  $R_{13}$ . Indem der Vorverstärker 8 von der jeweils gemessenen Spannung  $U_1$  die bekannte Spannung  $U_1(0)$  abzieht, erhält man  $\Delta U = i_1 \times R_{13}$ . Hieraus ergibt sich  $R_{13}$  zu  $\frac{\Delta U}{i_1}$ .

In der Praxis ist bei der beschriebenen Anordnung, wie Versuche gezeigt haben,  $R_{13}$  etwa 11 000mal größer als  $R_6$ . Mißt man also  $R_{13}$  zu 110  $\Omega$ , so bedeutet dies, daß der Flächenwiderstand der dünnen Schicht 1 etwa 10 Milliohm beträgt; mißt man dagegen 11 M $\Omega$ , so ist der Flächenwiderstand  $R_6$  bzw. 6 der dünnen Schicht 1 etwa 1 K $\Omega$ .

In der Fig. 3 ist das Ersatzschaltbild des Schwingkreises 3 im Falle der Resonanz dargestellt. Mit der Bezugzahl 16 ist hierbei der Kreiswiderstand bezeichnet.

In der Fig. 4 ist dargestellt, wie die wesentlichen Elemente der Schaltungsanordnung gemäß Fig. 2 bei einer Vorrichtung angebracht sind, die eine Meßwalze 20 aufweist, über die eine Bahn 21 abrollt, welche die zu messende dünne Schicht 1 trägt. Die Sensoren, welche jeweils aus einer Spule 2 und den zugehörigen elektronischen Bauteilen bestehen, sind in die Oberfläche dieser Meßwalze 20, z. B. an den Stellen 22, 24, 25 eingelassen. Hierdurch ist gewährleistet, daß jeder Sensor bei einer Umdrehung der Walze 20 einmal ein Nullsignal abgibt — nämlich dann, wenn die Bahn 21 nicht an der Spule anliegt — und einmal ein Meßsignal, wenn die Bahn 21 anliegt.

Die zu messende Schicht 1 auf der Bahn 21 befindet sich in einem genau zu reproduzierenden Abstand zur Spule, der sich z. B. aus 2 mm Abdeckung des Sensors zuzüglich der Stärke der Trägerfolie 21 zusammensetzt. Der Einfluß einer eventuellen Abweichung der Dicke der Folie 1 gegenüber der konstanten Dicke von 2 mm kann auf diese Weise vernachlässigt werden.

An einer Welle 26 der Meßwalze 20 sind noch Positionsgeber 33, 36 angebracht, die bewirken, daß in der Auswerte-Schaltung das Nullsignal  $U_1(0)$  bis  $U_3(0)$  und das Meßsignal  $U_1$  bis  $U_3$  auf zwei Speicher geschaltet werden. Die Differenz der beiden Signale  $U_R - U_R(0)$  ist, wie bereits oben erwähnt, eine nur von den Schichteigenschaften abhängige Spannung, die zur Schicht-Leitfähigkeit proportional ist. Hierdurch wird die Nullpunktdrift beseitigt, die bei derartigen Sensoren oft tausendfach höher ist als das Meßsignal. Dies ist insbesondere beim Einsatz in Vakuumanlagen günstig, wo die Prozeßkammer meist mehrere Stunden nicht geöffnet werden kann.

Der Abgriff der Spannungen  $U_1$  bis  $U_3$  erfolgt über die an der Welle 26 sitzenden Schleifringe 23, 27, 28. Diese Spannungen werden einer Verarbeitungseinrichtung 29 zugeführt und über Anzeigevorrichtungen 30, 31, 32 angezeigt. Die Anzeigevorrichtungen können hierbei 10-Volt-Zeigerinstrumente sein, bei denen z. B. ein Ausschlag von 1 V  $\triangleq$  100  $\Omega$  und 10 V  $\triangleq$  10  $\Omega$  bedeutet. Die Werte werden außerdem zu einem nicht dargestellten Anlagen-Rechner gegeben, der auch die  $\Omega$ -Werte errechnet und in ein Anlagen-Schaubild auf einem Bildschirm zur Darstellung bringt. Für die Erfassung der Winkelstellungen der Welle 26 können handelsübliche induktive, kapazitive oder optische Geber

33, 36 eingesetzt werden, durch die eine mit Aussparungen 34 versehene Scheibe 35 rotiert. Die Geber 33, 36 führen der Verarbeitungseinrichtung 29 Synchronisationsimpulse 18, 19 zu. Der Geber 33 liefert hierbei z. B. die Zeiten für die Meßvorgänge I, II, III, während der Geber 36 die Zeiten für die Nullvorgänge I, II, III liefert.

In der Fig. 5 ist ein erfindungsgemäßer Sensor im vergrößerten Maßstab dargestellt. Die Spule 2 befindet sich hierbei unmittelbar unterhalb einer Abdeckung 37, die etwa eine Dicke von 2 mm hat. Die elektronische Schaltungsanordnung 38, mit der die Spule 2 verbunden ist und die in der Fig. 6 noch näher beschrieben wird, befindet sich auf einer Platine 39, die über einen Koppler 78 mit einem 20poligen Flachbandkabel 89 in Verbindung steht. Über dieses Flachbandkabel 89 erfolgt die Stromversorgung und Fernsteuerung.

In der Fig. 6 ist eine Schaltungsanordnung im Detail dargestellt, welche die gesamte Elektronik eines Sensors sowie Auswerteschaltungen 9, 29 zeigt. Auf der linken Seite eines Trennungsstrichs 150 befindet sich die Elektronik 38 des Sensors, während rechts von diesem Strich ein Schleifringübertrager (nicht dargestellt) und die Auswerteschaltungen 9, 58 dargestellt sind.

Die Anzapfung 40 der Spule 2 ist auf einen Vorverstärker 41 gegeben, dem ein Anpassungstransformator 42 nachgeschaltet ist. Die Ausgangsspannungen dieses Anpassungstransformators 42 sind auf den Verstärker 56 geführt, der das Ausgangssignal des Transformators 42 um den Faktor 1000 verstärkt. Das derart verstärkte Signal wird auf eine Kapazitätsdiode 43 gegeben, die über einen Kondensator 105 die Frequenz des Oszillators 7 auf die Resonanz des Sensor-Schwingkreises nachregelt. Der Anschlußpunkt 135 des Kondensators 105 ist hierfür mit dem Kondensator 65 des Oszillators 7 verbunden.

Parallel zur Spule 2 sind der Kondensator und ein Widerstand 138 geschaltet, während parallel zur Spule 2 und zum Kondensator 4 über die Schalter 10, 45 Eichwiderstände 11, 44 schaltbar sind. Die Schalter 10, 45 werden hierbei über Inversionsgatter 46, 47 aus der Steuereinrichtung 9 gesteuert. Aus dieser Steuereinrichtung 9 werden auch zwei weitere Gatter 48, 49 angesteuert, die die Schalter 50, 51 beaufschlagen, mit denen Widerstände 52, 53, 54 kurzgeschlossen werden können. Die Inverter 46 bis 49 sind zusammen mit den Schaltern 51, 52 in handelsüblichen Schalterbausteinen enthalten. Hierdurch ist es möglich, den Verstärkungsgrad des Vorverstärkers 8, auf den das gleichgerichtete Stromsignal des Parallelschwingkreises 3 gegeben wird, stufig zu verstellen. Über einen Spannungs-Strom-Wandler 57 wird das Ausgangssignal des Vorverstärkers 8 über einen Schleifringübertrager 23, 27, 28 (Fig. 4) zur Auswertereinrichtung 29 und von dort auf eine Anzeigeeinrichtung gegeben. Der Oszillator 7, dessen Ausgangsspannung der Spule 2 zugeführt wird, enthält eine Induktivität 59, der zwei Kondensatoren 60, 61 parallelgeschaltet sind, wobei in Serie zu den Kondensatoren 60, 61 und zur Spule 59 ein Transistor 62 liegt. Parallel zu dem Kondensator 60 ist ein abstimmbarer Kondensator 65 geschaltet, der mit einem Widerstand 140 und mit dem Emitter des Transistors 62 verbunden ist. Die Basis dieses Transistors 62 ist an einen Spannungsteiler gelegt, der zwei Widerstände 63, 64 aufweist. Parallel zu diesem Spannungsteiler ist ein Kondensator 106 geschaltet.

Über einen Kondensator 107 und einen Widerstand 108 ist von dem Emitter des Transistors 62 eine Verbindung zu dem Schwingkreis 3 gelegt. Außerdem führt von diesem Emitter über einen Widerstand 66 eine Ver-

bindung zu einer Phasen-Nachregelanordnung 14, die einen 90°-Phasenschieber 147 aufweist, der aus vier Kondensatoren 72, 73, 71, 69 und zwei Widerständen 66, 68 besteht. Der Widerstand 70 bildet hierbei mit einem weiteren Widerstand 67 einen Spannungsteiler vor der Basis eines Transistors 76, dessen Emitter auf ein RC-Glied 74, 77 geschaltet ist.

Der Parallelschwingkreis 3 ist auch mit dem Vorverstärker 41 verbunden, der einen Transistor 82 enthält, welcher mit drei Widerständen 79, 80, 83 und einem Kondensator 81 beschaltet ist. Das Ausgangssignal dieses Vorverstärkers 41 ist über einen Kondensator 84 auf die Primärwicklung 86 eines Transformators 85 gegeben, dessen Sekundärwicklung 87 eine Mittenanzapfung 88 besitzt. Zu dieser Mittenanzapfung führt eine Verbindung über einen Widerstand 75 auf den Kondensator 77 der Phasen-Nachregelanordnung 14. Die Gesamtspannung an der Sekundärwicklung 87 wird nach Gleichrichtung durch Dioden 146, 90 und nach Glättung durch Kondensatoren 91, 92 über Widerstände 93, 94 auf die erste Stufe des zweistufigen Verstärkers 56 gegeben, die aus einem mit Widerständen 96, 97 beschalteten Operationsverstärker 95 besteht. Die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers 95 wird sodann über einen Widerstand 98 auf den einen Eingang eines zweiten Operationsverstärkers 99 gegeben, dessen zweiter Eingang über einen Widerstand 100 an Masse liegt. Im Rückkopplungszweig dieses Operationsverstärkers 99 befindet sich eine aus einem Kondensator 103 und einem Widerstand 102 bestehende Parallelschaltung. Das Ausgangssignal des Operationsverstärkers 99 ist über Widerstände 101, 104 auf die Kathode einer Kapazitätsdiode 43 sowie auf einen Kondensator 105 gegeben, welcher mit dem Kondensator 65 des Oszillators 7 verbunden ist.

Der zum Parallelschwingkreis 3 fließende Strom  $i_1$  erzeugt am Widerstand 108 eine Spannung, die über Dioden 109, 134 gleichgerichtet, durch Kondensatoren 110, 133 geglättet und über einen Kontakt 111 sowie über Widerstände 112, 115, 116 dem Vorverstärker 8 zugeführt wird, der die Spannung proportional verstärkt. Dem Kondensator 133 ist ein Widerstand 132 parallelgeschaltet. An den Verbindungspunkt der Widerstände 112, 115 ist ein Widerstand 114 gelegt, der an Masse liegt. Der Widerstand 116 liegt ebenfalls über einen weiteren Widerstand 117 an Masse. Von dem einen Eingang des Vorverstärkers 8 führt über einen Widerstand 119 eine Verbindung auf einen Spannungsteiler. Der Vorverstärker 8 enthält einen Operationsverstärker 124, in dessen Rückkopplungszweig ein Widerstand 122 mit einem hierzu parallelgeschalteten Kondensator 123 liegen. Die Eingänge dieses Operationsverstärkers 124 sind an Widerstände 120, 121 angeschlossen, von denen der Widerstand 120 mit dem Ausgang des Operationsverstärkers 118 verbunden ist und der Widerstand 121 an Masse liegt. Die Rückkopplung 122, 123 des Operationsverstärkers 124 ist über einen Widerstand 130, ein RC-Glied 129, 128 und eine Induktivität 127 mit der Auswerteschaltung 29 verbunden. Die vom Vorverstärker 8 verstärkte Spannung wird auf einen Spannungs-Strom-Wandler 57 gegeben, der über Schleifringe (Fig. 4) und eine Auswerteschaltung 29 eine Anzeigeeinheit ansteuert. Die Induktivitäten 126, 127 des Wandlers 57 sorgen dafür, daß keine Hochfrequenz aus dem Sensor nach außen dringt und daß der Sensor nicht von einer äußeren Hochfrequenz gestört werden kann.

Die Ausgangsspannung des Vorverstärkers 8 kann

hierbei durch Zu- und Abschalten verschiedener Widerstände 52 bis 55 an einen Operationsverstärker 118 verändert werden.

Bei dem Element 113 handelt es sich um einen 12-Volt-Stabilisator, der die Spannungsschwankungen ausgleicht, die beispielsweise über die Stromversorgungsleitung 149 ankommen.

Ein Meßvorgang mittels der beschriebenen Einrichtung erfolgt beispielsweise derart, daß zunächst der Schwingkreis 3 auf Resonanz abgestimmt wird. Nimmt man nun an, daß sich über der Induktivität 2 gerade keine zu messende Schicht 1 befindet, so gibt der Geber 36 ein Signal 18 "Nullen" an die Auswerteschaltung 29. Die Frequenz der Spannung  $U_1(0)$  sei zu diesem Zeitpunkt 1800 KHz. In einem Speicher der Auswerteschaltung 9 wird dieser Spannungswert abgespeichert. Nähert sich hierauf die Induktivität 2 aufgrund der Drehung der Walze 20 der zu messenden Schicht 1, so wird mit einer Zeitkonstanten von einigen  $10^{-3}$  Sekunden jede Blindkomponente im Schwingkreis 3 ausgeregelt. Befindet sich die zu messende Schicht 1 direkt über der Induktivität 2, so gibt der Positionsgeber 33 ein Signal 19 "Messen" an die Auswerteschaltung 29. Die Spannung  $U_1$ , deren Frequenz jetzt 1820 KHz sei, wird in der Auswerteschaltung 29 gespeichert. Jetzt wird die Differenz  $U_1 - U_1(0)$  gebildet, die dem Flächenleitwert bzw. dem reziproken Flächenwiderstand  $\frac{1}{R_0}$  proportional ist.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum zerstörungsfreien Messen des ohmschen Widerstands einer dünnen Schicht nach dem Wirbelstromprinzip, dadurch gekennzeichnet, daß die bei auf Resonanz abgestimmtem Schwingkreis (3) die Induktivität (2) nicht einer zu messenden Schicht (1) gegenüberliegt und ein Positionsgeber (33, 36) ein Nullsignal auf die Auswerteschaltung (29) gibt, in der das entsprechende Nullsignal gespeichert wird, daß bei Annäherung der Induktivität (2) an die zu messende Schicht (1) die Blindkomponente des Schwingkreises (3) mit kleiner Zeitkonstante ausgeregelt wird und daß dann, wenn die zu messende Schicht (1) direkt über der Induktivität (2) liegt, von einem Positionsgeber (33, 36) das Signal Messen an die Auswerteschaltung (29) gegeben und gespeichert wird und daß die Differenz zwischen dem Meßsignal und dem Nullsignal gebildet und angezeigt wird.

2. Einrichtung, insbesondere zum Durchführen des Verfahrens nach Anspruch 1, die eine Induktivität aufweist, die mit Wechselstrom beaufschlagt wird und deren Magnetfeld in den dünnen Schichten einen Wirbelstrom erzeugt, dessen Magnetfeld das ursprüngliche Magnetfeld der Induktivität schwächt, wobei die Induktivität mit einer Kapazität einen Schwingkreis bildet, der stets auf Resonanz gehalten wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Induktivität (2) in eine Walze (20) eingelassen wird und eine Abdeckung (37) aufweist, deren Oberfläche mit der Oberfläche der Walze (20) bündig ist, wobei die zu messende dünne Schicht (1) auf einer Trägerfolie (21) über die Walze (20) bewegbar ist.

3. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die zu messende dünne Schicht (1) auf die Trägerfolie (21) aufgedampft ist, die über die



Walze (20) geführt wird.

4. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Induktivität (2) mit einer elektronischen Schaltung (38) verbunden ist, die sich auf einer Platine (39) innerhalb eines Gehäuses (148) befindet, das über Steckkontakte (78) mit einem Flachbandkabel (89) verbunden ist. 5

5. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Resonanz des Schwingkreises (3) durch Nachregelung der Frequenz des diesen Schwingkreis speisenden Wechselstroms ( $i_1$ ) hergestellt wird. 10

6. Einrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß für die Erzeugung des Wechselstroms ein Hochfrequenzgenerator (7) vorgesehen ist, dessen Frequenz mittels einer Phasen-Nachregelanordnung (14) auf die jeweilige Resonanzfrequenz des Schwingkreises (3) eingestellt wird. 15

7. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwingkreis ein Parallelschwingkreis (3) ist. 20

8. Einrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Parallelschwingkreis (3) wenigstens eine diskrete Spule (2) und einen diskreten Kondensator (4) enthält. 25

9. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zu dem Schwingkreis (3) ein Widerstand (11) schaltbar ist.

10. Einrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Zuschaltung des Widerstands (11) fernbedienbar erfolgt. 30

11. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß ein Verstärker (8) vorgesehen ist, der den zum Schwingkreis (3) fließenden Strom ( $i_1$ ) verstärkt. 35

12. Einrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß dem Verstärker (8) ein Spannungs-Stromwandler (57) nachgeschaltet ist.

13. Einrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Verstärkungsgrad des Verstärkers (8) über mehrere Widerstände (52 bis 55) stufig schaltbar ist. 40

14. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwingkreis (3) mit einem Vorverstärker (41) verbunden ist, der einen Transformator (42) speist, dessen Sekundärwicklung (87) eine Mittenanzapfung (88) besitzt, die an einen 90°-Phasenschieber (147) angeschlossen ist. 45

15. Einrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Phasen-Nachregelanordnung (14) aus einem 90°-Phasenschieber (147), einem Vorverstärker (41), einem Transformator (42), einem Verstärker (56), einer Kapazitätsdiode (43), einem Widerstand (104) und einem Kondensator (105) besteht. 50

16. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Speicher vorgesehen sind, von denen der eine Speicher ein Nullsignal und der andere Speicher ein Meßsignal speichert, und daß die Differenz der beiden Signale als Maß für den Widerstand der zu messenden dünnen Schicht (1) dient. 60

17. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß für Eichzwecke die dünne Schicht (1) durch ein Material mit bekanntem Flächenwiderstand gebildet wird. 65

18. Einrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Eichung im Vakuum erfolgt und

eine Simulation einer Widerstandsschicht durchgeführt wird, indem ein Widerstand (11) mit bekanntem Wert zum Schwingkreis (3) ferngesteuert parallelgeschaltet wird.

19. Einrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Eichung dann erfolgt, wenn der Sensor gerade ein Nullsignal liefert.

---

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

---

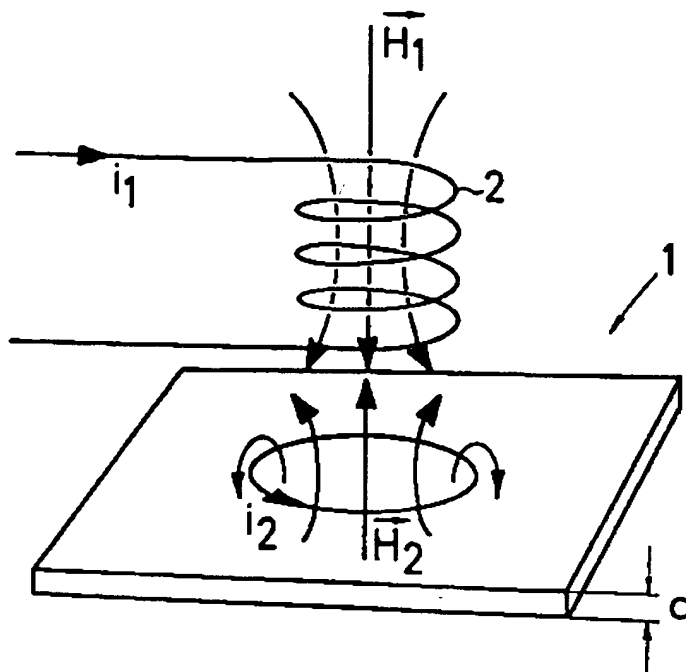


FIG. 1

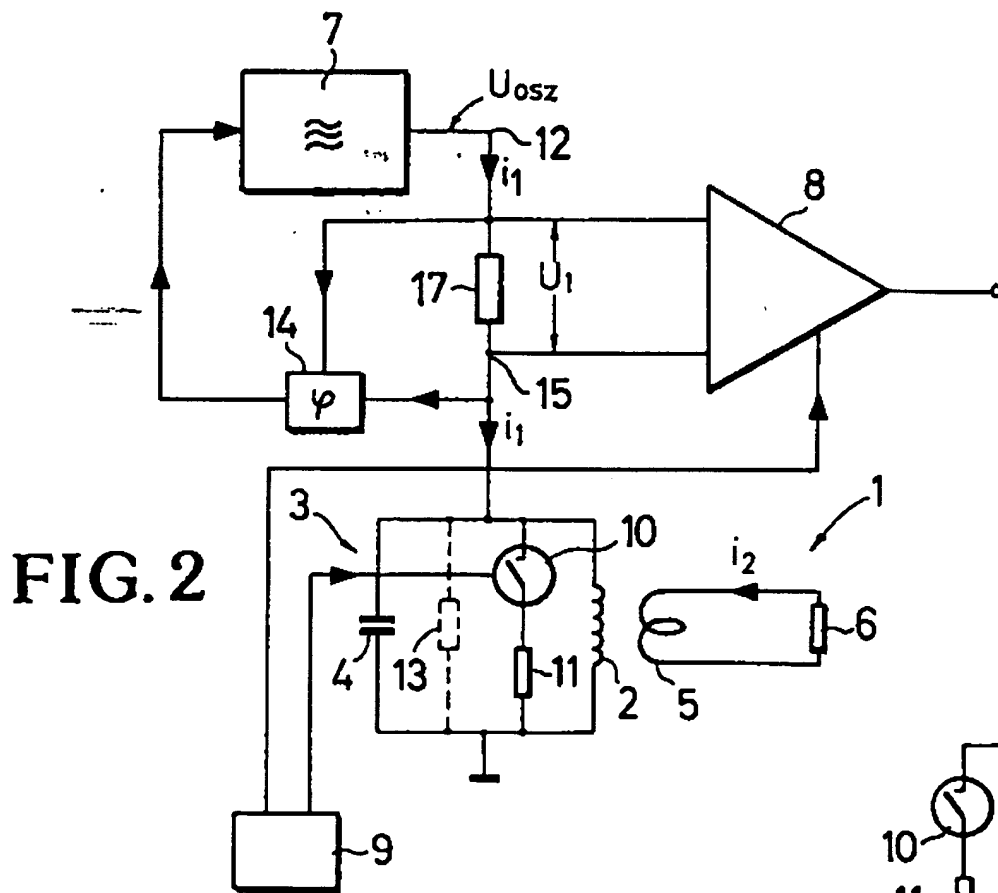
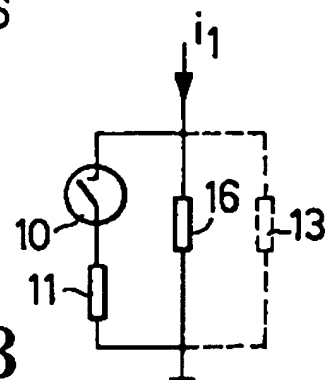


FIG. 2

FIG. 3



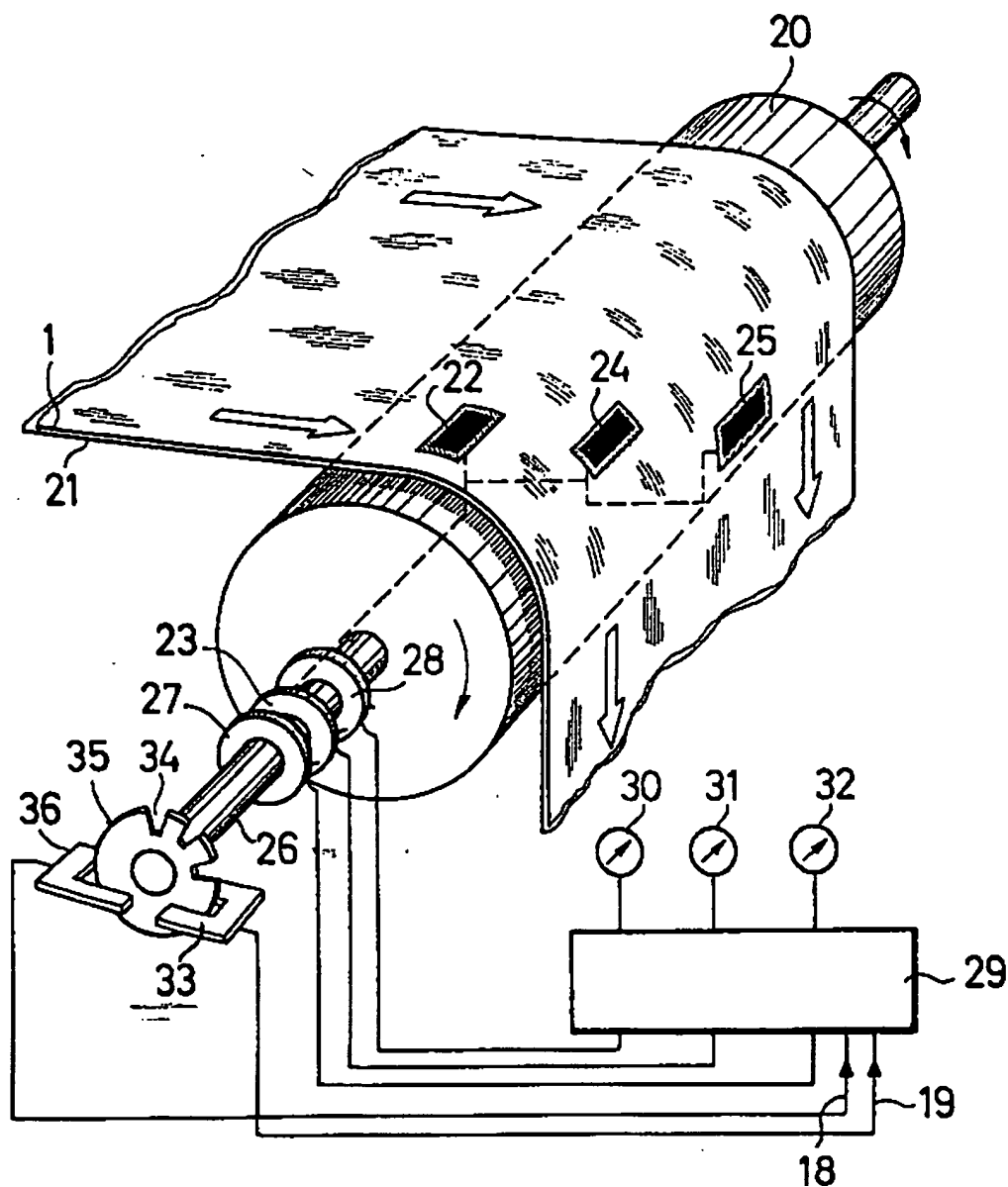


FIG. 4

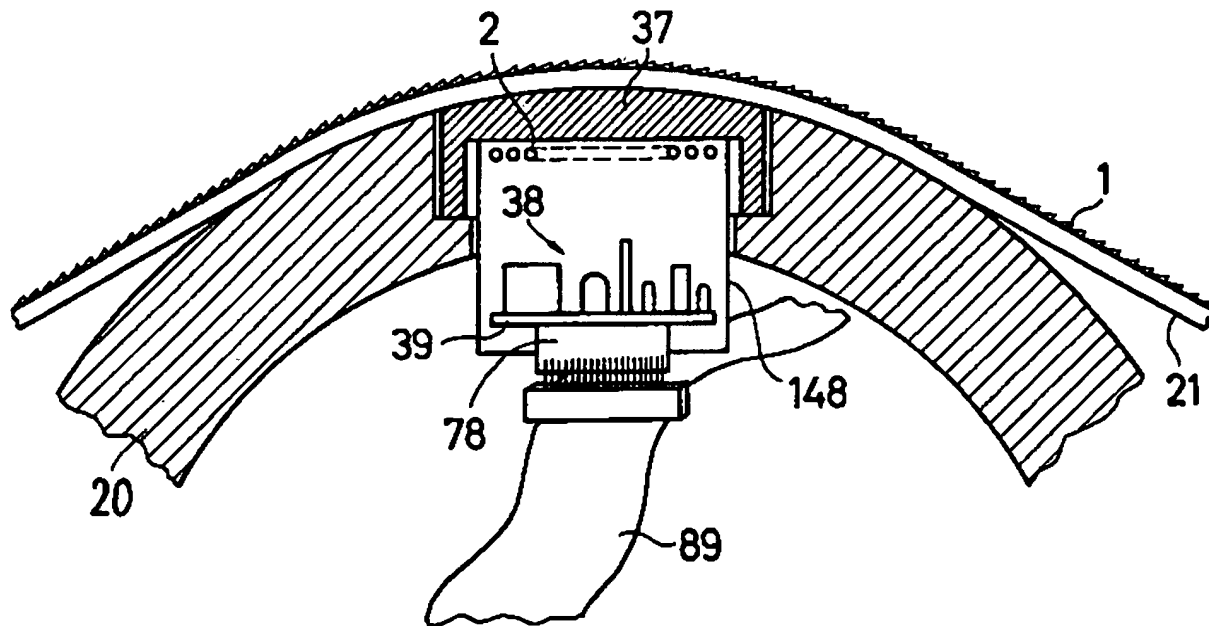


FIG. 5

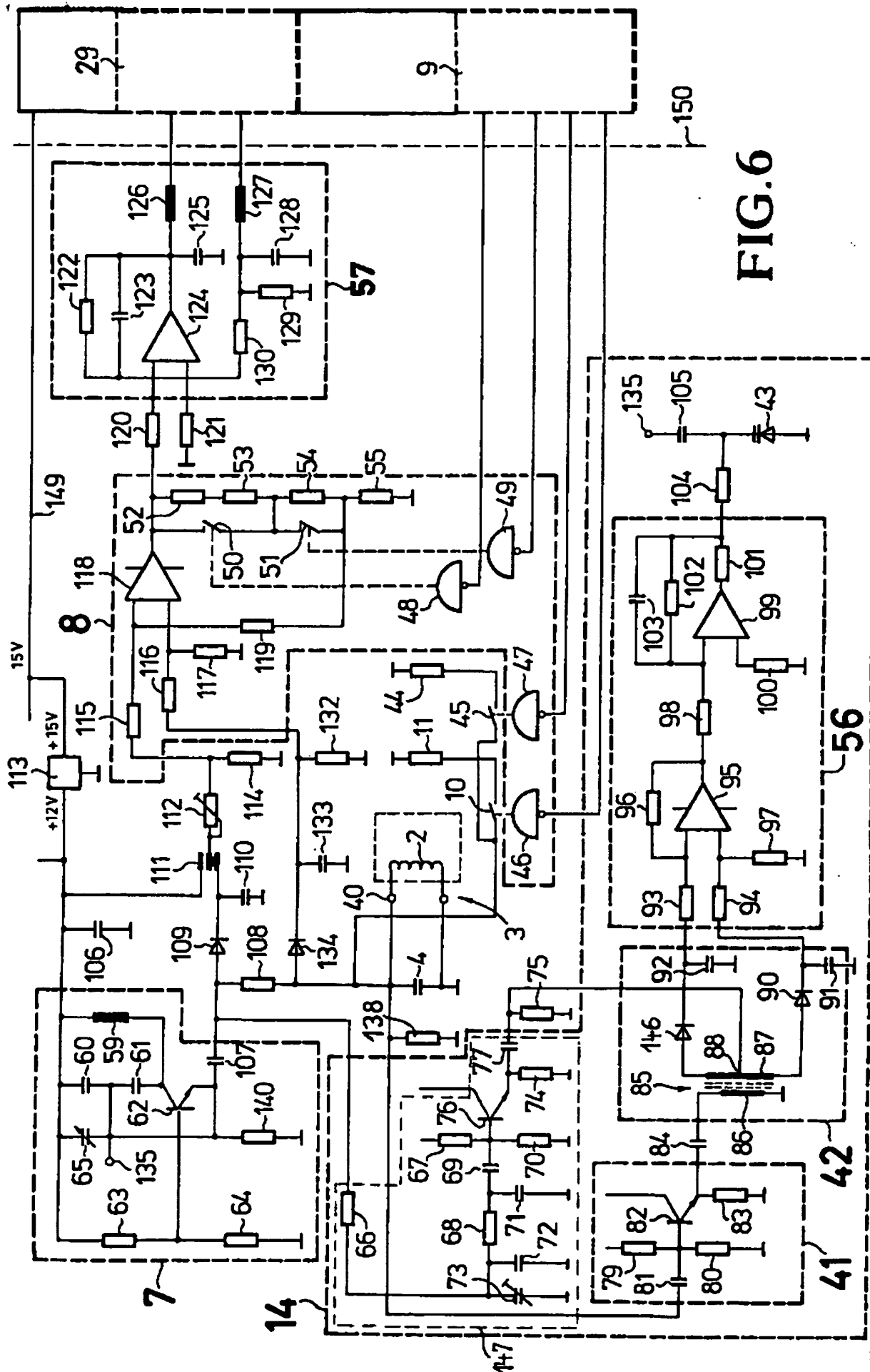


FIG. 6

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**